

Herramienta de simulación para el dimensionamiento de líneas ferroviarias electrificadas

Jorreto Marcos, Federico. España

citef.fjorreto@etsii.upm.es

Sanz Bobi, Juan de Dios. España

citef.jdsbobi@etsii.upm.es

López García, Jesús. España

citef-jlopez@etsii.upm.es

Lozano Ruíz, María Ángeles. España

citef.malozano@etsii.upm.es

1. Introducción

Las necesidades del mercado del transporte actual exigen un incremento en la velocidad de circulación de los medios de transporte que realizan trayectos de media y larga distancia. Ésto, el compromiso con el medio ambiente y la saturación del espacio aéreo europeo, dejan ver el porqué del éxito actual de las líneas ferroviarias europeas de alta velocidad y en especial para las líneas de alta velocidad españolas con el titánico plan de inversiones que pronostica un futuro prometedor para este sector.

Para alcanzar mayores prestaciones de forma más racional, económica y sistemática, se impone la utilización de herramientas de simulación, basadas en modelos matemáticos, que permitan simular el comportamiento del sistema de forma fiable y económica. Los requerimientos de los ferrocarriles hasta ahora permitía apoyarse en diseños veteranos totalmente probados, sin embargo hoy en día las exigencias son tales que para alcanzar el objetivo se deben utilizar herramientas informáticas dedicadas al estudio del comportamiento eléctrico. La herramienta de simulación, por tanto, permite el cálculo de las características técnicas de la electrificación obteniendo las magnitudes físicas necesarias para evaluar un funcionamiento correcto y dimensionar correctamente los elementos que lo componen.

2. Sistemas de electrificación

Dada la generalidad de sistemas usados en Europa se necesita una herramienta válida para los principales sistemas de electrificación europeos: 1x25 kV a 50 Hz, 2x25 kV a 50 Hz, 15 kV a 16 ⅔ Hz y corriente continua.

Una línea eléctrica ferroviaria está formada fundamentalmente por las subestaciones que alimenta a la línea, las zonas neutras que delimitan la línea y por los centros de autotransformación (en el caso del sistema 2x25kV):

- Subestación. Suelen posicionarse en medio de la línea en el caso de corriente alterna o en los extremos en el caso de corriente alterna. En sistemas de electrificación de 1x25

kV suele abarcar 30 Km aproximadamente. En sistema de 2x25 kV alcanza los 60 Km.

- Zonas neutras. Su función principal es la de separación de fases con objeto de evitar cortocircuitos y separación de zonas con objeto de permitir una mejor operatividad y mantenimiento.
- Centros de autotransformación. Son autotransformadores distribuidos a lo largo de la línea eléctrica cuando ésta es de 2x25 kV. Su función principal es la de reducir la tensión de salida de la subestación de 50 kV a los 25 kV que necesita el tren para funcionar. También mejora las emisiones electromagnéticas y se suelen situar cada 10 Km.

3. Dimensionamiento de la línea eléctrica

Durante el funcionamiento de una línea eléctrica ferroviaria deben cumplirse tres condiciones de diseño. Corresponden a criterios de dimensionamiento eléctrico.

- La tensión en la catenaria debe estar comprendida entre valores máximos y mínimos normalizados en cualquier punto del trazado.
- La corriente que circule por cada conductor no debe superar el valor máximo admisible para la elección de los conductores elegidos, según UIC 798.
- La potencia demandada por los trenes no debe ser superior a la potencia nominal de los grupos de las subestaciones, según CEI 146.
-

Todas estas condiciones que caracterizan el correcto funcionamiento deben cumplirse tanto en situación de funcionamiento normal como en situaciones degradadas.

Para saber si se cumplen estas condiciones es necesario conocer los principales factores que intervienen en los procesos eléctricos. Los datos necesarios se pueden clasificar en datos del material rodante, datos del trazado, datos de las circulaciones y datos del sistema de electrificación.

4. La herramienta de simulación

La herramienta de simulación está formada por un módulo mecánico y un módulo eléctrico. El módulo mecánico se encarga de calcular los movimientos de los trenes que se han programado en una tabla de horarios e itinerarios introducida por el usuario. Posteriormente el módulo eléctrico modeliza los trenes como sumideros de potencia y calcula las caídas de tensión y demás parámetros eléctricos. Este procedimiento se lleva a cabo en cada paso de integración desde que sale el primer tren de la estación hasta que llega el último a su destino.

5. Simulador mecánico

Un tren en su movimiento presenta una serie de resistencias al avance. Estas resistencias pueden clasificarse atendiendo a la causa que las provoca en: resistencias al avance, resistencias locales (gravidad y curvas), resistencias debidas a túneles y resistencias de inercia

(incluidas las masas rotativas). La resistencia total al avance de los vehículos es la suma algebraica de todos los factores anteriormente expuestos y todas ellas deben ser vencidas para poder acelerar el tren.

Conocida la resistencia total al avance y la variación de la energía cinética es posible conocer el consumo instantáneo de cada tren:

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta E_r = \Delta E_t$$

donde ΔE_c es la variación de la energía cinética, ΔE_p es la variación de la energía potencial, ΔE_r es la variación de energía debida a las fuerzad resistentes y ΔE_t es la variación de la energía debida al esfuerzo tractor.

La fuerza resistente se modeliza como un polinomio de orden 2 cuyos parámetros son característicos de cada tren. Igualmente el esfuerzo de tracción de cada tren se caracteriza por su curva de tracción velocidad-esfuerzo tractor.

Dado que la finalidad del simulador es el dimensionamiento eléctrico de la línea las circulaciones de trenes siguen la curva de potencia máxima con una limitación de aceleración definida por el usuario.

Los trenes interactúan entre sí simplemente con la distancia de frenado y una distancia de seguridad predeterminada con objeto de facilitar al usuario la generación de una tabla de circulaciones más realistas, sin embargo no está programado ningún sistema de señalización determinado.

6. Simulador eléctrico

Tenga o no refuerzo, la línea estará formada por un conjunto de conductores acoplados magnéticamente. Este estudio del acoplamiento inductivo, se refiere a la impedancia propia de un conductor con retorno por tierra y la impedancia mutua entre dos conductores aislados que tiene ambos retorno por tierra. Para el cálculo de dichas impedancias se emplean las fórmulas de Carson. Se ha utilizado el desarrollo en serie, porque es un método adecuado en los casos de conductores en que existe una gran separación, baja resistividad del suelo y sobretodo cuando debe estudiarse la variación de la impedancia con la altura de las líneas sobre la superficie del suelo.

Las impedancias propias y mutuas quedan definidas por las siguientes expresiones donde los términos $\Delta R, \Delta X$, son los términos de corrección y tienen en cuenta el efecto de retorno por tierra:

$$Z'_{ii} = \underbrace{R'_i + j \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \omega \cdot \frac{\mu_r}{4}}_{\text{parte interna de la impedancia}} + \underbrace{j \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \omega \cdot \ln \frac{2h_i}{r_i} + 2 \cdot (\Delta R_{ii} + j \Delta X_{ii})}_{\text{parte externa de la impedancia}} \quad \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$Z'_{ij} = j \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \omega \cdot \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} + 2 \cdot (\Delta R_{ij} + j \Delta X_{ij}) \quad \frac{\Omega}{\text{km}}$$

La línea se representa mediante la reducción del modelo de 10, 12 o 14 conductores, a un sistema de 4 conductores acoplados magnéticamente:

- Catenaria de la vía 1 (hilo de contacto, sustentador y feeder de refuerzo si lo hubiera).
- Catenaria de la vía 2 (hilo de contacto, sustentador y feeder de refuerzo si lo hubiera).
- Retorno (carriles, hilo de retorno).
- Feeder negativo (si lo hubiera).

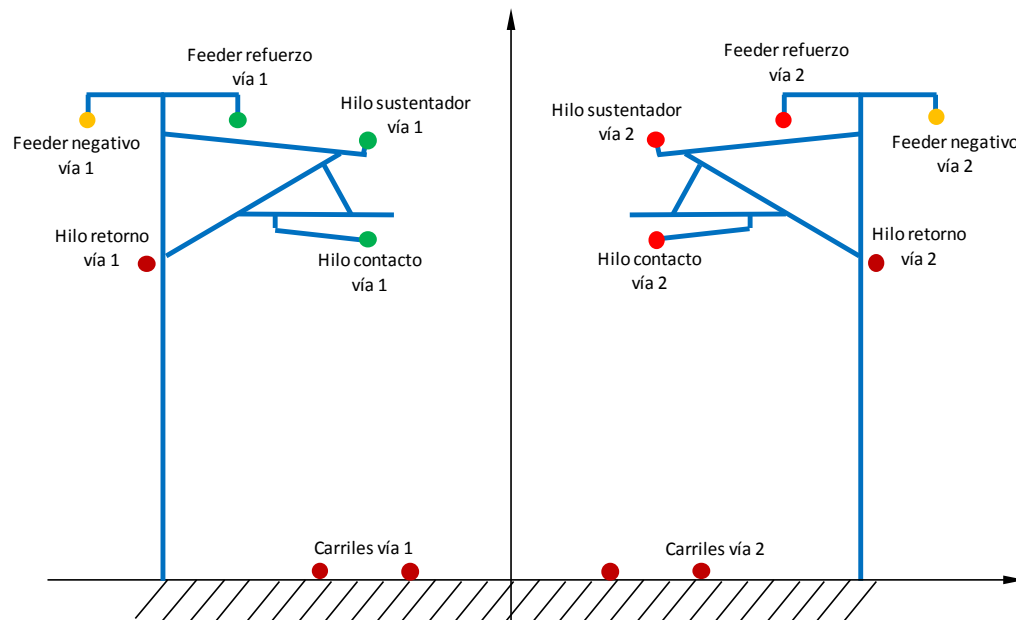


Figura 1 Sección transversal de un sistema 2x25kV de dos vías

A lo largo de la línea se colocan distintos elementos que deben modelarse con sus respectivas matrices de admitancias: subestaciones, autotransformadores y enlaces entre vías, de forma que cada elemento se representa mediante un sistema de ecuaciones $[I]=[Y] \cdot [U]$, siendo $[Y]$ la matriz de admitancias.

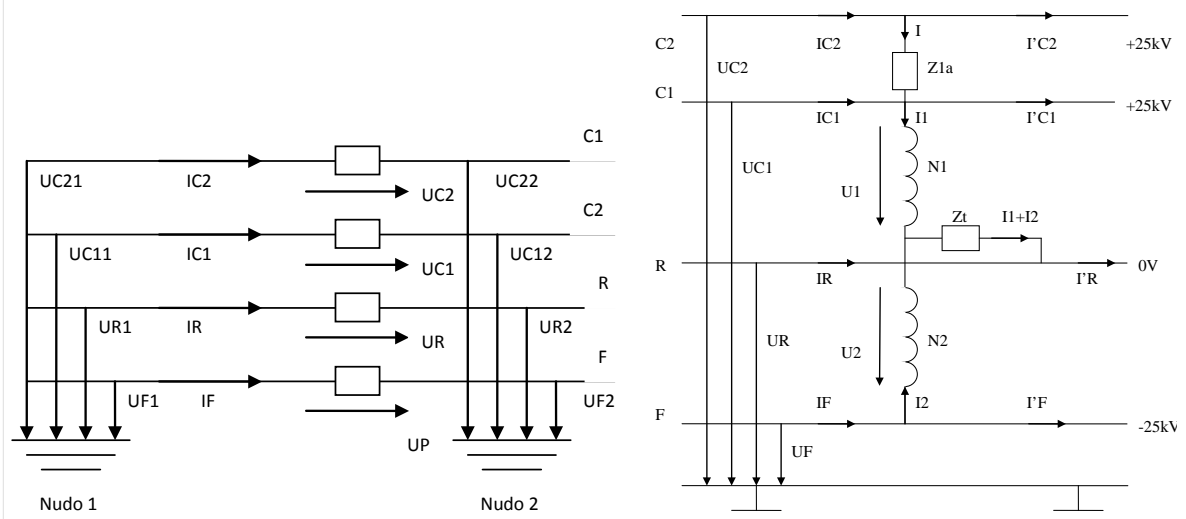


Figura 2 Izquierda: modelo del circuito entre dos nudos. Derecha: modelo del circuito de un autotransformador

Juntando todas las ecuaciones de cada elemento y las admitancias entre nudos se llega a un sistema de la forma:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & & & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}$$

Puesto que la relación Potencia-Tensión en pantógrafo de los trenes no es lineal, se hace necesario el uso de métodos iterativos para la resolución del problema.

7. Cortocircuito

También existe la posibilidad de realizar ensayos de cortocircuito. Antes de realizar el ensayo de cortocircuito, se pueden realizar simulaciones de distintos ensayos, con el fin de obtener la posición del cortocircuito más adecuada, en función de las intensidades máximas admisibles de los cables. Los resultados se refieren al estudio del cortocircuito en régimen permanente de cortocircuitos de una catenaria a tierra, o bien cortocircuitos de las dos catenarias a tierra a través de impedancia.

8. Resultados

Los principales datos necesarios para el correcto dimensionamiento son proporcionados por el programa de simulación: tensiones en catenaria, intensidades en catenaria, potencia de los grupos de la subestación y potencia de los autotransformadores.

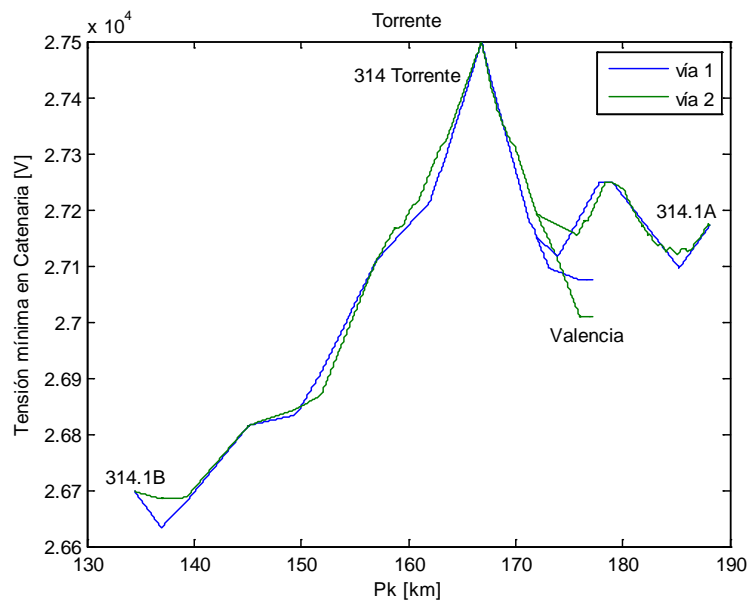


Figura 3 Tensión mínima en catenaria

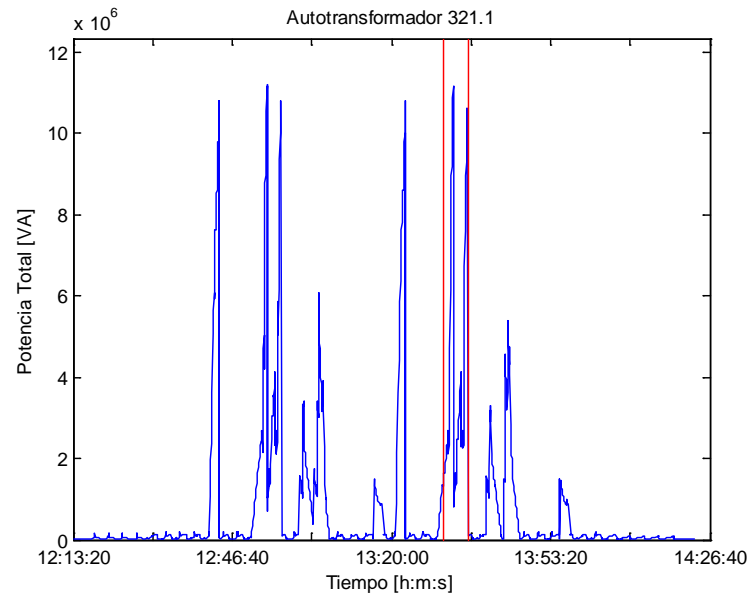


Figura 4 Potencia aparente en un autotransformador

Además de los parámetros básicos de dimensionamiento es posible, dado que se conoce la evolución temporal de las corrientes que fluyen por los hilos, calcular las temperaturas instantáneas de éstos. Para ello basta aplicar el balance térmico a un elemento diferencial de cable:

$$dQ_j + dQ_e - dQ_s - dQ_a = 0$$

Donde dQ_j es la energía generado por efecto Joule, dQ_e es la energía entrante al cable, dQ_s es la energía saliente del cable y dQ_a es la energía almacenada debida a la capacidad térmica del material.

Así es posible dimensionar la catenaria de forma que se eviten daños por sobrecargas incluso cuando se superan las máximas cargas esperadas con un dimensionamiento menos fino, ya que los picos de carga sólo ocurren en cortos períodos de tiempo.

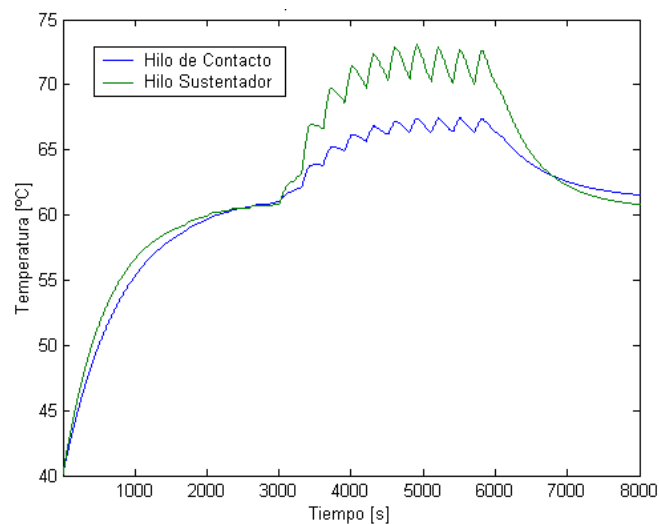


Figura 5 Temperatura instantánea de hilo de contacto y sustentador

9. Conclusión

Se ha presentado una herramienta de dimensionamiento eléctrico de líneas eléctricas ferroviarias y ayuda al diseño de líneas aéreas de contacto. En el futuro se completará el número de herramientas para la ayuda al diseño como son el cálculo de tensiones inducidas en líneas paralelas y el cálculo de tensiones de paso y contacto. También se potenciará el software para que sea capaz de tratar con topologías de la línea con desvíos, bypass, etc.

[1] KIEßLING, PUSCHMANN, SCHMIEDER. (2001). *Contact Lines for Electric Railways. Planning, Design, Implementation*, Siemens.

[2] CCITT, “Directrices sobre la protección de las líneas de telecomunicación contra los efectos perjudiciales de las líneas de energía eléctrica y de las líneas ferroviarias electrificadas”, Vol I y IV, 1989.

[3] PILO, E. (2003). *Diseño optimo de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad*, Universidad Pontificia de Comillas.

[4] EN 50163:2004, *Railway applications - Supply voltages of traction systems*.

[5] TSI, *Technical specification for interoperability – Energy subsystem*.